Pêches et Océans Canada
Fisheries and Oceans Canada

Sciences des écosystèmes et des océans
Ecosystems and Oceans Science

Secrétariat canadien de consultation scientifique
Région du Pacifique
Avis scientifique 2018/023

ÉVALUATION DES CAPACITÉS DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE ET DU MODÈLE DE SUIVI DE PARTICULES AFIN D'ÉCLAIRER LES DÉCISIONS SUR LE CHOIX DES SITES ET LA GESTION DES INSTALLATIONS DE PISCICULTURE MARINE EN COLOMBIE-BRITANNIQUE

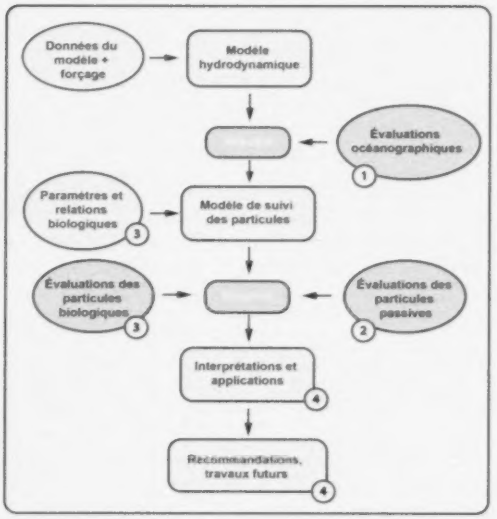

Figure 1. Représentation graphique des composantes nécessaires à l'élaboration, l'évaluation et l'utilisation du modèle hydrodynamique et du modèle de suivi des particules pour la dispersion des particules provenant des installations d'aquaculture (adaptée à partir de l'étude de Salama et Rabe 2013*). Les nombres contenus dans les cercles jaunes représentent les objectifs établis dans le cadre de référence de la présente évaluation.*

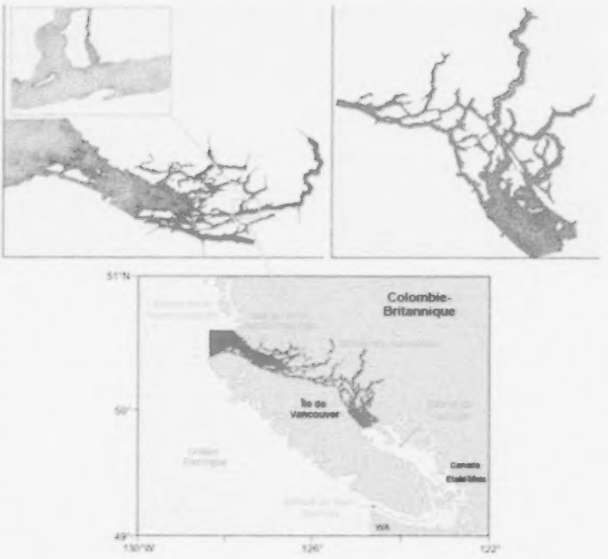

Figure 2. Zones représentées par le modèle hydrodynamique et le modèle de suivi des particules : grille triangulaire irrégulière à résolution variable dans l'archipel de Broughton (bleu) offrant un agrandissement de la confluence du bras de mer Knight et du chenal Tribune (cadre jaune), et grille de la région des îles Discovery (rouge).

Contexte :

Pêches et Océans Canada (MPO) est responsable de la réglementation et de la gestion de l'industrie de l'aquaculture en Colombie-Britannique. Ces responsabilités incluent la délivrance des licences aux établissements d'aquaculture et la spécification des conditions de ces dernières. Le MPO reconnaît qu'il existe des interactions entre les activités aquacoles et l'environnement naturel. Les risques associés à ces interactions sont envisagés et gérés à l'aide d'un ensemble d'outils réglementaires.

Mai 2018

Canada

Les critères de sélection des sites de pisciculture marine actuellement appliqués par le MPO sont une adaptation de ceux utilisés auparavant par la province de la Colombie-Britannique. Il s'agit de critères scientifiques qui ont évolué au fur et à mesure de la découverte de nouveaux renseignements. L'application des critères de sélection des sites d'activités aquacoles vise à créer des tampons (liés à la proximité ou créant une distance de séparation) par rapport aux attributs généraux ou spécifiques (environnementaux ou socioéconomiques) de l'écosystème. Les critères actuels de sélection des sites comprennent un ensemble de facteurs généraux appliqués sur toute la côte.

Dans le cadre de l'engagement du Ministère à évaluer les interactions entre les activités aquacoles et l'environnement naturel en vue d'orienter les décisions réglementaires et de gestion, des recherches ont été entreprises en vue d'améliorer la compréhension du devenir probable des particules passives et des particules actives sur le plan biologique qui sont soumises aux conditions propres aux régions de l'archipel de Broughton et des îles Discovery. Comprendre les facteurs et les incertitudes qui influencent la dispersion des particules pourrait fournir des indications propres à une zone sur l'évaluation des critères actuels de sélection des sites et la définition des zones de gestion de l'aquaculture.

Le présent avis scientifique résulte de la réunion qui s'est tenue du 20 au 22 janvier 2014, sur le thème « Évaluation de la capacité du modèle hydrodynamique et du modèle de suivi des particules à éclairer les décisions concernant la sélection des sites et la gestion des installations de pisciculture marine en Colombie-Britannique ». D'autres publications concernant cet événement seront affichées sur le calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada lorsqu'ils seront disponibles.

SOMMAIRE

- La méthodologie de modélisation utilisée pour simuler les caractéristiques hydrodynamiques (modèle de volumes finis des eaux côtières [FVCOM]) et des mouvements des particules offre une démarche rigoureusement scientifique pour représenter deux zones complexes d'un point de vue océanographique de la côte de la Colombie-Britannique (l'archipel de Broughton et les îles Discovery).
- Le modèle hydrodynamique (FVCOM) élaboré pour les régions de l'archipel de Broughton et des îles Discovery reproduisait efficacement les principales caractéristiques de circulation océanique, ainsi que les valeurs de température et de salinité qui ont été mesurées pendant les périodes d'évaluation.
- Le modèle de suivi des particules passives offre de l'information sur la distance et le taux de dispersion, ainsi que sur les concentrations des particules. Les schémas de répartition des dériveurs de surface libérés dans la région étudiée de Broughton en mars 2008 se sont révélés satisfaisants.
- Le modèle de suivi des particules passives utilisé dans l'étude de la région des îles Discovery n'a pas été validé en raison de l'absence d'expérience liée aux dériveurs. Toutefois, au vu des études sur les dériveurs menées dans d'autres régions et de la capacité du modèle FVCOM à simuler les caractéristiques hydrodynamiques de cette région, le mouvement des dériveurs observés et la dispersion simulée des particules devraient plus ou moins coïncider avec ceux observés dans la région étudiée de Broughton.
- Ce modèle de suivi des particules est capable de simuler le devenir des particules présentant des caractéristiques biologiques, telles que le déplacement nycthéméral du pou du poisson et la vulnérabilité d'un agent pathogène à un rayonnement ultraviolet. Les incertitudes liées aux paramètres et aux caractéristiques biologiques nécessitent de faire preuve de prudence dans l'interprétation des résultats. Plus précisément, l'évaluation des conséquences environnementales du comportement simulé des particules biologiques allait bien au-delà de la portée de cet examen.

- Il a également été admis qu'une validation approfondie des simulations offertes par le modèle de suivi des particules biologiques pourrait être nécessaire. Ce travail devrait être précédé d'une évaluation de la sensibilité du modèle aux hypothèses biologiques et à l'incertitude des paramètres, d'une part, et d'une analyse coût-avantage liée à l'utilisation prévue, d'autre part.
- Un certain nombre d'outils tirés des résultats de l'association du modèle hydrodynamique et du modèle de suivi des particules ont été examinés. Parmi ces outils figurent des diagrammes matriciels illustrant la connectivité entre les sites d'aquaculture, des cartes des concentrations des particules qui peuvent être produites à des intervalles donnés, des schémas des flux des particules représentant les principales trajectoires de dispersion et des animations reflétant la dispersion des particules qui aident à visualiser l'aspect des déplacements probables.
- On a reconnu l'utilité des outils de modélisation pour orienter les décisions liées à la gestion de l'aquaculture. Selon l'enjeu, des simulations peuvent être nécessaires pour un éventail d'intervalles, des conditions météorologiques représentatives, les conditions de rejet de l'eau douce, et pour les régions pour lesquelles aucun modèle n'est encore établi.
- Le modèle hydrodynamique et le modèle de suivi des particules pourraient être utilisés en dehors de l'aquaculture, notamment pour modéliser les particules liées à des déversements d'agents polluants ou à la dispersion des larves. Ils peuvent également être utilisés pour étudier l'énergie marémotrice.

INTRODUCTION

Justification de l'évaluation

Pêches et Océans Canada est responsable de la réglementation et de la gestion de l'industrie aquacole en Colombie-Britannique, ce qui comprend la délivrance de permis aux sites aquacoles et l'imposition de conditions de permis. En vue d'éclairer les décisions concernant la réglementation et la gestion, des recherches ont été entreprises afin de mieux comprendre les interactions entre les activités aquacoles et l'environnement naturel en modélisant le devenir des particules passives et des particules actives sur le plan biologique. Deux modèles ont ainsi été élaborés à cette fin : 1) un modèle basé sur la circulation océanique qui prévoit a posteriori les courants tridimensionnels, les salinités, les températures et les élévations bidimensionnelles des surfaces, et 2) un modèle de suivi des particules qui utilise les produits du modèle basé sur la circulation océanique pour simuler le comportement de dispersion des particules libérées à des moments et à des endroits précis. L'évaluation examinera la capacité de ces modèles, utilisés de concert, à estimer la connectivité potentielle entre les sites de pisciculture marine de l'archipel de Broughton et des îles Discovery en ce qui a trait au transport des particules et à déterminer les priorités liées à leur perfectionnement. Ces régions comprennent des systèmes océaniques côtiers complexes et sont des zones importantes d'aquaculture dans des parcs en filet en Colombie-Britannique. Comprendre les facteurs et les incertitudes qui influencent la dispersion des particules pourrait fournir des indications propres à une zone quant à l'évaluation des critères actuels de sélection des sites et à la définition de zones de gestion de l'aquaculture.

Contexte

Pêches et Océans Canada est le principal organisme de réglementation de l'industrie aquacole en Colombie-Britannique. Le Ministère reconnaît qu'il existe des interactions entre les activités aquacoles et l'environnement naturel, et les risques liés à ces interactions sont pris en compte

et traités à l'aide d'une série d'outils réglementaires, notamment les critères de sélection des sites pour les installations aquacoles existantes et proposées. Les critères actuels de sélection des sites comprennent un ensemble de deux facteurs généraux appliqués sur toute la côte. Dans le cadre de l'engagement du Ministère à évaluer les interactions entre les activités aquacoles et l'environnement naturel, des recherches ont été entreprises en vue d'améliorer notre compréhension du comportement et du devenir probable des particules passives et des particules actives sur le plan biologique qui sont soumises à des conditions propres aux régions. Ces modèles liés – modèle hydrodynamique et modèle de suivi des particules – ont été élaborés afin de simuler la dispersion des particules. Comprendre les facteurs et les incertitudes qui influencent la dispersion des particules pourrait fournir des indications propres à une zone sur l'évaluation des critères actuels de sélection des sites et la délimitation des zones de gestion de l'aquaculture.

Les régions de l'archipel de Broughton et des îles Discovery constituent un réseau de chenaux étroits et de fjords profonds qui présentent un régime hydrodynamique figurant parmi les plus complexes au monde sur le plan de l'usage aquacole. Des modèles hydrodynamiques offrant une résolution spatiale suffisante pour refléter à la fois la complexité des systèmes et des courants autour des sites aquacoles ont été élaborés pour ces régions côtières de la Colombie-Britannique (Figure 1, 2). Ces modèles de circulation océanique produisent et enregistrent des champs de mélange tridimensionnels des courants, des salinités et des températures, combinant des champs et des élévations bidimensionnelles des surfaces pendant des périodes déterminées. Ces résultats modélisés sont utilisés pour créer un second modèle, le modèle de suivi des particules, qui estime la dispersion des « particules » qui sont libérées à des moments et des endroits précis de ces régions. Les particules du modèle de suivi peuvent être passives, être associées à un comportement déterminé (p. ex., la capacité de flotter ou de couler), ou avoir des attributs biologiques ou chimiques (p. ex., dépendance statistique à la mortalité, dégradation).

Cette évaluation examine la capacité des deux modèles à représenter les conditions hydrodynamiques, et à simuler la dispersion probable des particules dans les régions étudiées de l'archipel de Broughton et des îles Discovery. Elle étudie la convivialité des modèles en tant qu'outils d'élaboration des critères de sélection des sites des zones de gestion, les limites ou les hypothèses à prendre en compte lorsque l'on utilise les modèles, ainsi que les données et les analyses supplémentaires qui pourraient être nécessaires pour valider l'application de ces modèles à des fins particulières.

ÉVALUATION

Modèle hydrodynamique

Il existe un nombre limité de modèles hydrodynamiques permettant de modéliser des régimes hydrodynamiques complexes, dont des fjords profonds et des chenaux étroits. Le modèle FVCOM, anciennement appelé « modèle de volumes finis des eaux côtières », est le modèle standard utilisé par Pêches et Océans Canada pour ces régions complexes. Ce modèle caractérise les variations de rapidité et de densité dues aux forces des marées et au forçage atmosphérique, ainsi qu'au mélange de l'eau douce et de l'eau salée. Il utilise une grille triangulaire horizontale à résolution variable, capable de définir les éléments de petite taille du littoral, ainsi que les passages étroits et les couches de profondeurs qui épousent le terrain afin de tenir compte des écarts importants de profondeurs courants sur la côte de la Colombie-Britannique. La grille triangulaire à résolution variable permet une plus grande flexibilité quant à la représentation des régions présentant un littoral et des caractéristiques bathymétriques complexes, comme c'est le cas en Colombie-Britannique. Le modèle FVCOM tient compte des

conditions de la limite supérieure des eaux de marée tirées de modèles de domaines connexes plus larges ou de mesures relatives à l'élévation et à la circulation de l'eau, ainsi que des forces de l'eau douce et des phénomènes météorologiques (tension du vent et flux de chaleur) obtenus à l'aide de mesures ou d'autres résultats modélisés.

Les équations du modèle FVCOM contiennent des hypothèses sous-jacentes qui pourraient limiter leur capacité à décrire tous les types de problèmes de circulation océanique. Elles supposent que l'eau est incompressible et ne permettent pas, par conséquent, de modéliser les ondes sonores et l'expansion thermique des eaux océaniques dues au réchauffement climatique. La dynamique incluant de fortes convections ou des ondes internes importantes, comme celles observées autour du seuil du bras de mer Knight, ne peut être représentée en raison de l'hypothèse du modèle selon laquelle la pression en un point quelconque de l'océan est uniquement due au poids de l'eau qui se trouve au-dessus de celui-ci. En outre, les hypothèses et les paramètres utilisés à la fois dans les champs de mélange verticaux et horizontaux des équations primitives font actuellement l'objet de recherches et ne peuvent illustrer avec précision les phénomènes réels de mélange.

Des modèles de circulation fondés sur le modèle FVCOM ont été élaborés pour les régions de l'archipel de Broughton et des îles Discovery, et offrent une résolution minimale de 50 m (Figure 2). Le Service hydrographique du Canada (SHC) a fourni de l'information numérisée sur le littoral et sur la bathymétrie en vue d'élaborer les grilles triangulaires pour ces régions. Des renseignements plus précis ont pu être obtenus au moyen de triangles plus petits et en augmentant le nombre total de grilles nécessaires pour couvrir la région visée. Cependant, ces facteurs augmentent le temps de calcul et, par conséquent, le choix d'une grille à résolution est souvent déterminé par un équilibre entre les ressources informatiques et la nécessité d'obtenir des caractéristiques importantes avec une précision suffisante. La capacité du modèle FVCOM à utiliser une grille à résolution variable dans des zones d'intérêt particulier constitue un attribut de taille.

Champs initiaux et forçage du modèle FVCOM

Les champs tridimensionnels de température et de salinité constituent des prérequis du modèle FVCOM. Ces renseignements résultent généralement d'une combinaison d'observations antérieures et récentes des données CTP (conductivité, température, profondeur) à divers niveaux de couverture spatiale et temporelle.

Il est nécessaire, dans le modèle FVCOM, de connaître le forçage des marées. En règle générale, on utilise entre cinq et huit composantes – les plus importantes – étant donné qu'elles représentent environ 60 à 85 % de l'amplitude de marée dans les plages de fréquences diurnes et semi-diurnes. Ces renseignements sont obtenus en combinant les analyses des données antérieures des marégraphes et les résultats issus de modèles d'études des marées couvrant un domaine plus vaste. Une profondeur minimale de 5 m est imposée dans l'ensemble du modèle, car la topographie escarpée typique des régions des fjords rend inutile la modélisation de la zone intertidale (mouillage et séchage).

Les données relatives au rejet d'eau douce proviennent d'un réseau hydrométrique de quelques rivières entretenu par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) : des estimations doivent être réalisées dans les rivières non jaugées. Dans l'archipel de Broughton, on disposait de données sur les rejets pour six rivières. Ces renseignements ont été extrapolés pour les rivières Glendale, Ahta et Kakweikan en comparant les bassins hydrologiques, comme le décrit l'étude de Foreman *et al.* 2006. Dans les îles Discovery, on disposait de données relatives au rejet d'eau douce pour quatre rivières. Des estimations ont été réalisées pour huit autres bassins hydrologiques. La salinité des rejets a généralement été établie à zéro. En

règle générale, la température des rivières a été estimée en tenant compte des observations CTP de surface.

Il est difficile d'indiquer un forçage atmosphérique en raison de la rareté des stations météorologiques et de l'absence de modèles atmosphériques offrant une résolution suffisante pour illustrer correctement les écarts dus au terrain montagneux des régions étudiées. Le vent est un facteur important en ce qui a trait à la circulation régionale dans les bras de mer. Un réseau de stations a donc été installé dans l'ensemble de l'archipel de Broughton en mai 2007 et dans les îles Discovery en avril 2010. Depuis lors, ces stations, de concert avec celles d'Environnement Canada aux aéroports de Port Hardy et de Campbell River, et de quelques autres situées dans des stations de pêche, ont généralement fourni des observations utilisables. Deux méthodes ont été élaborées afin d'interpoler et d'extrapoler l'observation des vents pour tous les éléments des grilles des modèles. Une stratégie a été mise sur pied afin de combler les lacunes de données dues à un dysfonctionnement de l'équipement ou à des vents contraignants à l'emplacement des sites, provenant de directions spécifiques. Bien que l'on ait réussi à combler quelques-unes de ces lacunes en corrélant les observations des stations proches ou permanentes (p. ex., celles des aéroports de Port Hardy et de Campbell River), l'élaboration d'un modèle atmosphérique à haute résolution offrant une dynamique complète ou simplifiée (p. ex., Hayco 2010) constituerait la solution de prédilection à long terme.

Résultats et évaluation des simulations effectuées à l'aide des modèles

Les modèles hydrodynamiques de Broughton et des îles Discovery ont été préalablement examinés et sont publiés dans les principaux documents (Foreman *et al.* 2009 et Foreman *et al.* 2012). La résolution de la grille originale de Broughton s'élevait à 43 000 nœuds, avec une résolution spatiale de l'ordre de 200 m. La grille des îles Discovery comptait environ 36 000 nœuds, et affichait une résolution d'environ 100 m au plus. Depuis ses publications, une grille de résolution plus fine a été établie pour la région de Broughton, avec environ 98 000 nœuds et une résolution spatiale d'à peine 50 m à proximité des sites aquacoles. Dans l'étude précédente de Foreman *et al.* 2009, 2012, des simulations rétrospectives ont été effectuées sur des périodes relativement courtes en raison de limites dans les champs de forçage adéquats et des observations des courants sur place durant ces périodes. Les simulations rétrospectives originales ont ignoré le forçage des flux de chaleur, et ont utilisé les meilleurs champs de forçage disponibles (vents, marées et rejets) afin d'utiliser les modèles de circulation océanographique de Broughton et des îles Discovery en mars et avril 2008, et en avril 2010, respectivement, puis ont comparé les résultats des modèles aux observations disponibles sur certains sites dans les domaines du modèle. Depuis ses publications, des simulations rétrospectives supplémentaires, incluant le forçage des flux de chaleur, ont été effectuées pour ces régions.

Simulations rétrospectives de Broughton	i) Du 1er au 28 mai 2008
	ii) Du 10 au 31 mai 2010
	iii) Du 1er mars au 31 juillet 2009
Simulations rétrospectives des îles Discovery	iv) Du 29 avril au 31 octobre 2010

Aucune évaluation des résultats du nouveau modèle n'a été effectuée à l'aide d'un courantomètre, ni en tenant compte de la température et de la salinité mesurées ou des données thermiques. Par conséquent, les évaluations présentées dans cette étude sont des exemples tirés de résultats publiés précédemment dans l'étude de Foreman *et al.* 2009, 2012, qui utilisent une grille à mailles grossières et ne tiennent pas compte du forçage des flux de chaleur.

Broughton (mars 2008) : En règle générale, il y a eu une bonne corrélation entre les valeurs modélisées et les valeurs mesurées à Broughton en mars 2008. Le vent constituait le principal facteur de courant et les stations météorologiques supplémentaires ont amélioré la définition du champ de vent. Certaines stations météorologiques étaient partiellement en retrait du terrain côtier escarpé et ont nécessité une interpolation. Par conséquent, certaines régions du domaine du modèle comprenaient un forçage du vent plus précis que d'autres.

Le 16 mars, le modèle a illustré un puissant épisode de vent d'ouest en le sous-estimant légèrement. Toutefois, les valeurs interpolées concernant le vent ont présenté des incohérences (pendant une période durant laquelle les données liées au vent n'étaient pas disponibles) et les épisodes de vent mesurés immédiatement avant et après ces périodes ont été sources de préoccupation. La qualité des paramètres de forçage du vent a pu avoir des conséquences négatives sur les courants modélisés. Les courants observés et modélisés ont coïncidé raisonnablement lorsque l'on y a inclus le forçage du vent. Toutefois, les courants modélisés étaient plus précis en eaux profondes (au-delà de 50 m) qu'en surface (moins de 20 m). Les coefficients de corrélation pour les eaux profondes étaient constamment supérieurs à 0,72. En comparaison, les coefficients de corrélation pour les eaux de surface oscillaient entre 0,47 et 0,84. Les vents influençant davantage les courants en surface, alors que ces derniers sont plutôt soumis aux marées en profondeur, les incertitudes liées au forçage du vent ont probablement réduit la précision des courants modélisés dans les eaux de moins de 20 m de profondeur.

Une faible variabilité de la température et de la salinité en mars 2008 a compliqué l'évaluation du rendement du modèle. Cependant, en tenant compte de cette restriction, une comparaison des températures de l'eau de surface suggère une précision raisonnable (écart de valeur efficace inférieur à 1 °C). Un écart plus important a été relevé entre les salinités modélisées et mesurées. Cet écart peut être dû au fait que la salinité est plus sensible aux influences à l'échelle locale. De piètres estimations du rejet d'eau douce ou des estimations imprécises des vents causant le panache des rivières pourraient être à l'origine de cet écart.

Îles Discovery (avril 2010) : La baroclinie modélisée dans les îles Discovery durant cette période n'a pas illustré correctement les valeurs observées dans la colonne d'eau. Trois zones ont été utilisées aux fins de comparaison, notamment le passage Discovery, le chenal Nodales et le cap Mudge. Bien que les amplitudes des courants de marée modélisées et observées près de la surface coïncident raisonnablement, ce n'était pas le cas à une profondeur plus importante de la colonne d'eau. Les vitesses modélisées en surface étaient relativement précises au passage Discovery, mais dépassaient les valeurs observées au chenal Nodales et ont été sous-estimées au cap Mudge. La circulation présentait également des incohérences à plus de 100 m de profondeur, au passage Discovery et au cap Mudge.

L'étude de Foreman *et al.* 2012 indiquait que la principale défaillance des simulations du modèle de circulation dans la région des îles Discovery consistait en une représentation moins précise des courants modélisés de la colonne d'eau en profondeur qu'en surface. Étant donné que de nombreuses particules provenant des exploitations piscicoles se forment et restent généralement près de la surface, où la précision du modèle est meilleure, le modèle de dispersion utilise les résultats à des profondeurs où la précision est aussi plus élevée. Toutefois, les inexactitudes en profondeur justifient une étude plus approfondie. Une nouvelle grille à plus haute résolution, notamment dans les régions présentant des gradients de profondeur élevés, réduira le manque de précision. On reproduira les modèles des simulations et les comparaisons avec les données mesurées à l'aide de cette nouvelle grille offrant une résolution plus élevée.

Modèle de suivi des particules (passives)

Ce modèle utilise des champs tridimensionnels de vitesse, de température et de salinité calculés et enregistrés à intervalles réguliers par le modèle FVCOM, et les applique afin de déterminer la dispersion, l'âge ou la mort des « particules » libérées à des moments et des endroits donnés. La turbulence à l'échelle de la grille secondaire, qui n'est pas représentée dans le modèle FVCOM, peut être incluse dans la dispersion en ajoutant une composante modélisée selon la méthode de marche aléatoire. Il faut veiller à ce que cette composante soit réaliste.

Il faut prêter une attention particulière aux frontières terrestres lorsque les particules approchent du littoral. Dans ces modèles, elles sont maintenues aux frontières terrestres jusqu'à ce que le champ de vitesse les écarte. Concrètement, elles peuvent, dans ce modèle, s'échouer temporairement sur le littoral, mais dériveront lorsque le champ de vitesse le permettra.

Les trajectoires de particules s'appuient sur des périodes et des régions qui présentent des résultats hydrodynamiques. L'algorithme de Runge-Kutta utilisé dans le modèle de calcul des trajectoires des particules tenant généralement compte de pas de temps inférieurs aux résultats horaires (habituellement utilisés) dans le modèle FVCOM, la fréquence des résultats du modèle FVCOM peut influencer les trajectoires. Les analyses de sensibilité du modèle fondé sur les conditions de mars 2009 dans le détroit de la Reine-Charlotte indiquaient que des intervalles de 15 minutes étaient préférables aux intervalles d'une heure actuellement utilisés pour obtenir les résultats du modèle FVCOM. Toutefois, comme ce résultat dépendra probablement du lieu et de la période, un échantillonnage de 15 minutes pourrait ne pas toujours convenir. Des expériences examinant les écarts de résultats des modèles, fondées sur les enregistrements des intervalles du modèle FVCOM, seront nécessaires pour les différentes régions et périodes.

Des simulations de suivi des particules passives ont été effectuées dans la région des îles Discovery pour avril 2010. Les résultats des modèles suggèrent que, même si la majeure partie des particules se déplace vers la frontière ouest du détroit de Johnstone, certaines particules pourraient se diriger vers le sud-est et entrer dans le détroit de Georgie. Toutefois, les résultats de ce modèle n'ont pas encore été comparés aux données mesurées.

Le modèle de suivi des particules traite les frontières océaniques ouvertes comme des frontières terrestres, et maintient les particules à cet endroit jusqu'à ce qu'elles soient repoussées de la frontière par un vecteur différent. Ainsi, il se produit une accumulation des particules à cette frontière qui n'est pas réaliste étant donné qu'elles poursuivraient leur déplacement vers le nord, dans le détroit de la Reine-Charlotte et la région modélisée de l'archipel de Broughton. À l'heure actuelle, les deux domaines des modèles ne sont pas liés. Cependant, afin de tester un éventuel déplacement subséquent des particules, de nouvelles particules ont été créées dans le modèle de Broughton, le long de la frontière avec le modèle du détroit de Johnstone. Aucun renseignement sur les vents n'était disponible pour le modèle de Broughton en 2010. Les essais ont, par conséquent, été réalisés à l'aide des données de mars 2009. Bien que l'on ait utilisé des années et des périodes différentes, l'essai a démontré que des particules pourraient, dans les conditions examinées, être transférées de la région des îles Discovery à des exploitations de l'archipel de Broughton (Figure 3A). Cela démontre que les relations entre les modèles des différentes régions pourraient fournir de l'information sur le déplacement des particules dans des régions géographiques plus vastes, mais que cela nécessiterait des travaux supplémentaires afin de valider les résultats modélisés et les temps de déplacements dans ces régions.

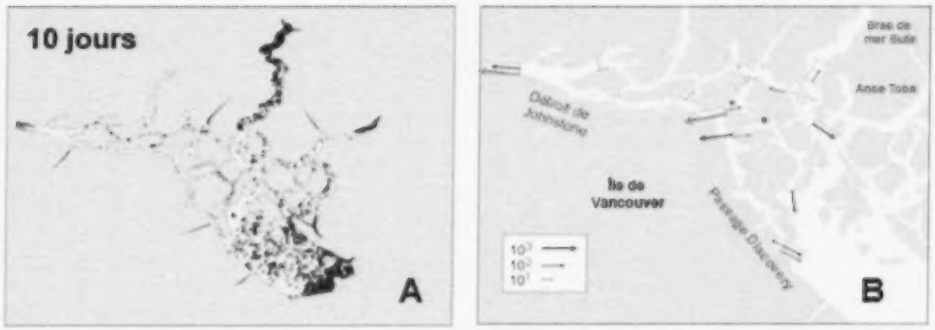

Figure 3. (A) Dispersion simulée des particules passives 10 jours après leur libération dans 32 sites de la région des îles Discovery, en avril 2010. Le rouge et le turquoise indiquent respectivement des concentrations plus ou moins élevées. (B) Flux de particules virtuelles libérées à trois endroits (points) et suivis alors qu'elles traversaient 13 transects des principaux passages des îles Discovery. Les vecteurs représentent la direction et la densité des trajectoires simulées des particules.

La simulation modélisée de la libération des particules dans les îles Discovery en avril 2010 a également été utilisée pour étudier la variabilité de la direction et le taux de déplacement des particules à partir des lieux de libérations (emplacements des exploitations de Freddie Arm, Brougham et Barnes, Figure 3B). Les résultats suggèrent qu'il existe une forte variabilité de la direction et de la vitesse des particules, et que des particules différentes libérées sur les mêmes sites pourraient suivre d'autres itinéraires.

Des simulations des particules passives ont été menées dans l'archipel de Broughton en s'appuyant sur les conditions de mars 2009, afin de rechercher la connectivité hydrodynamique entre les emplacements d'exploitations piscicoles. Les résultats préliminaires sont présentés dans un tableau sur la connectivité afin de caractériser les transferts simulés entre les exploitations (Figure 4). C'est l'exploitation d'origine qui a toujours présenté la connectivité la plus élevée (ligne rouge diagonale). Ce tableau peut être interprété comme une carte thermique sur laquelle les couleurs plus chaudes symbolisent une connectivité plus élevée. La symétrie des diagonales (p. ex., exploitations 14 et 8) indique un échange mutuel de particules. Une asymétrie peut s'expliquer en grande partie par les champs de débits estuariens moyens de surface et le fait que l'exploitation réceptrice se trouve du côté de la mer par rapport à l'exploitation émettrice.

Exploitations réceptrices \ Exploitations émettrices	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	[illegible]	4078	2372	135	339	25	65	28	3	14	118	1	3	13	25	1	4			
2	282	[illegible]	1032	4	47	82	205	5	9	96	442		3	3	180	11	11	2		
3	236	883	[illegible]	20	80		3	3		1	14	1		1	1					
4	1241	311	363	[illegible]	64		1	20				5	4	4						
5	1030	369	448	630	[illegible]	1	2	281	51		2	121	61	148	7	1				
6	29	14	16	41	14	[illegible]	390	294	339	463	665	158	255	322	1445	41	33	6	10	20
7						8	[illegible]			517	225				265	801	1078	521	86	31
8	1887	640	528	3241	954	69	81	[illegible]	3576	103	322	3284	2595	[illegible]	795	4	1		1	1
9	50	9	19	85	25	111	120	429	[illegible]	187	454	281	828	548	968	10	5			
10		2	2			13	585	2	4	[illegible]	471		1	1	322	86	74	22	5	6
11	4	218	190	2		146	982	40	85	616	[illegible]	13	34	53	977	87	98	28	9	13
12	291	64	69	416	814	3	1	943	229	1	6	15775	1383	517	38					
13	528	147	181	808	393	5	5	2113	650	12	12	4770	[illegible]	1437	68	1			3	7
14	1403	464	390	2337	681	39	48	[illegible]	1068	71	227	2755	2365	[illegible]	565	5	1		2	2
15	4	58	61	14	5	883	1865	156	213	2165	[illegible]	85	127	190	[illegible]	211	221	53	31	34
16						96	136	4	11	23	16	1	12	10	20	[illegible]	[illegible]	[illegible]	2058	908
17				1		36	9	4	3	1			6	6	2	2014	[illegible]	[illegible]	658	381
18						17	4	1					1	7		1164	1641	[illegible]	289	169
19	4	1	3	9	1	805	36	112	164	16	28	90	140	178	69	1850	1016	656	[illegible]	[illegible]
20	21		4	11	2	1125	31	260	195	19	31	150	197	236	100	1274	689	459	[illegible]	[illegible]

Figure 4. Exemple de simulations modélisées visant à étudier la connectivité hydrodynamique entre les sites des exploitations. Celles-ci s'appuient sur des simulations modélisées de l'archipel de Broughton, en mars 2009. Les résultats de la dispersion simulée n'ont pas été validés avec les événements observés.

Évaluation du modèle de suivi des particules passives

Des études de dériveurs GPS et des simulations du modèle FVCOM ont été menées dans l'archipel de Broughton en mars 2008, et ont permis d'évaluer le modèle de suivi des particules pendant cette période. Les mouvements simulés de 6 000 particules comparées aux trajectoires des six dériveurs ont révélé que les résultats du modèle FVCOM correspondant à un pas de temps d'une heure créeront initialement (pendant six heures au plus) des incohérences entre les positions modélisées et celles observées. Les comparaisons effectuées ultérieurement indiquent que les positions des dériveurs et des nuages de particules coïncident bien. Les particules simulées tout comme les dériveurs ont suivi des trajectoires qui s'écartaient du milieu du chenal et se rapprochaient du littoral. Cependant, le modèle a permis aux particules de poursuivre leur déplacement après être entré en contact avec la côte, alors que les dériveurs se sont arrêtés une fois le littoral atteint. Ajuster les paramètres du modèle qui régissent le comportement à proximité du littoral pourrait faire coïncider davantage les particules et les dériveurs.

Aucune étude sur les dériveurs n'a été menée dans la région des îles Discovery à ce jour. Des évaluations du modèle FVCOM et du modèle de suivi des particules menées dans l'Atlantique et dans le Pacifique confirment que les écarts entre les dispersions modélisées et observées demeurent dans l'intervalle normal lié aux incertitudes attribuables à la caractérisation des mouvements horizontaux et verticaux de l'eau dans les modèles. Toutefois, des études supplémentaires sur les dériveurs seront nécessaires pour valider les résultats du modèle dans des régions complexes telles que celles des îles Discovery.

Modèle de suivi des particules (actives sur le plan biologique)

Le modèle de suivi des particules actives sur le plan biologique est similaire au modèle de suivi des particules passives, hormis le fait que les particules sont influencées par leur environnement. On peut leur associer un comportement (comme une capacité à flotter ou à couler), ainsi que des attributs biologiques ou chimiques qui, par exemple, simulent une progression des étapes du cycle de vie et la dépendance statistique à la mortalité, ou la dégradation en substances différentes. Le pou du poisson et le virus de la nécrose hématopoïétique infectieuse (VNHI) sont deux exemples de particules biologiques qui ont été

modélisées dans le suivi des particules. Ils ont été présentés comme exemples afin d'illustrer les types de renseignements supplémentaires qui sont nécessaires pour modéliser des particules biologiques, ainsi que l'incertitude accrue qui peut résulter de ces particules dans les résultats des modèles. Compte tenu de ces exemples, il était évident que le modèle de suivi des particules devrait tenir compte de paramètres spécifiques aux particules biologiques pour caractériser de façon significative leur devenir. L'évaluation du modèle FVCOM et du modèle de suivi des particules a indiqué que ces derniers permettent d'intégrer des paramètres qui tiennent compte des attributs biologiques. Cependant, l'incertitude liée aux paramètres biologiques accroît l'incertitude générale de l'ensemble des résultats.

Application des critères de sélection des sites aquacoles et des zones de gestion

La présentation des résultats des expériences de suivi des particules visant à orienter les décisions relatives à la sélection des sites aquacoles pourrait inclure des aperçus des nuages de dispersion pour certaines périodes suivant la libération des particules (p. ex., Figure 3A), des diagrammes vectoriels et des diagrammes illustrant les flux de particules afin d'examiner la trajectoire et le taux de dispersion dominants (p. ex., Figure 3B), ainsi que des tableaux de connectivité pour résumer la probabilité de transmission entre des sites d'aquaculture ou d'autres endroits spécifiques (Tableau 1). En outre, il est possible de réaliser des animations de la dispersion des particules afin d'examiner les changements pendant des périodes déterminées. Des statistiques sur la position et la variabilité moyennes d'un nuage de dispersion (p. ex., Figure 11 et Figures 46-52 de l'étude Page *et al.* 2013) peuvent être calculées à partir des résultats des modèles. Cependant, dans le réseau complexe de chenaux qui longent la côte de la Colombie-Britannique, interpréter ces résultats peut être difficile.

Afin d'éviter les coûts importants liés à l'élaboration et à l'actualisation des modèles opérationnels capables, en tout temps, de prévoir la dispersion des particules et permettre ainsi à un gestionnaire d'estimer les vecteurs de transmission potentiels, il serait possible d'intégrer au préalable un ensemble de cartes illustrant la dispersion des particules dans diverses conditions saisonnières (p. ex., rejet d'une rivière) et météorologiques. Ces résultats seraient ensuite intégrés à d'autres données géoréférencées (p. ex., trajectoires migratoires des stocks de poissons sauvages, aires marines protégées, zones d'élevage des mollusques et crustacés).

Sources d'incertitude

1. La disponibilité limitée des données de forçage signifie que les simulations offertes par les modèles n'ont été menées que pour des périodes déterminées. Les conditions océanographiques physiques à proximité de la côte de la Colombie-Britannique peuvent varier considérablement au fil du temps. Les composantes poussées par le vent et celles liées au courant des estuaires, la température et la salinité peuvent varier considérablement. Dans la présente application, le modèle FVCOM a été utilisé pendant des périodes relativement courtes et au cours d'années déterminées, et peut ne pas avoir illustré l'ensemble de cette variabilité.
2. Toutes les particules ne sont pas identiques, et réagiront donc différemment. Elles peuvent se trouver à des profondeurs différentes, être, par conséquent, soumises à différents courants, et pourront nécessiter un suivi pour différentes périodes en fonction de la persistance attendue. Par conséquent, les résultats d'un modèle unique de suivi des particules correspondant à une période donnée ne refléteront pas la répartition de tous les types de particules.
3. Dans le présent modèle, les particules qui atteignent la frontière du modèle ne la dépassent pas, mais demeurent à proximité de celle-ci, créant des accumulations artificielles.

4. Les champs initiaux de température et de salinité fondés sur une combinaison des observations CTP (conductivité, température, profondeur) antérieures et récentes peuvent ne pas offrir une couverture spatiale et temporelle adéquate.
5. Les imprécisions des résultats du modèle hydrodynamique peuvent provoquer ce qui suit :
   a. la résolution de la grille : une résolution plus élevée offrira de meilleurs résultats, mais nécessite davantage de ressources informatiques;
   b. des imprécisions dans les champs de forçage;
   c. des représentations bathymétriques arrondies en raison de la résolution disponible;
   d. des valeurs numériques d'advection approximatives;
   e. un paramétrage imprécis des mélanges et de la diffusion;
   f. la physique non prise en compte dans les équations utilisées.
6. Les imprécisions des résultats du modèle de suivi des particules peuvent provoquer ce qui suit :
   a. la propagation des imprécisions du modèle FVCOM au modèle de suivi des particules;
   b. l'ajout d'une composante aléatoire au modèle afin de tenir compte de la physique non représentée dans le modèle;
   c. la fréquence de stockage des résultats du modèle FVCOM aux fins d'intégration dans le modèle de suivi des particules, c.-à-d. déterminer si les pas de temps utilisés pour les particules en question sont appropriés.
7. Les données relatives au rejet d'eau douce sont seulement disponibles pour certains réseaux hydrographiques des régions étudiées. Pour d'autres rivières, les données ont été déduites, ce qui peut accroître l'incertitude quant au rejet d'eau douce, un facteur hydrodynamique majeur dans les environnements comprenant des fjords.
8. En l'absence de mesures directes, les températures de l'eau des rivières ont généralement été estimées à partir d'observations de la température d'une surface à proximité. Ces données auront une incidence sur les schémas des courants et les couches de mélange, et constituent un champ de résultats essentiel.
9. En l'absence de modèle atmosphérique adéquat, il existe peu de données météorologiques permettant le forçage des modèles hydrodynamiques. Le forçage du vent est important, tout comme le flux de chaleur, et les observations directes doivent être interpolées et extrapolées pour l'ensemble des éléments de la grille d'un modèle. L'utilisation de données sur le forçage du vent de meilleure qualité qui permettrait de mieux représenter les conditions locales pourrait offrir la plus grande possibilité d'amélioration du modèle.
10. Selon le type de particules déterminées que l'on modélise, il peut être nécessaire de modifier leur comportement lorsqu'elles atteignent le littoral. La présente analyse a permis aux particules de dériver. Toutefois, des applications particulières pourraient nécessiter que les particules soient fixées au littoral lorsqu'elles l'atteignent.
11. En fonction de l'enjeu, on aura besoin de renseignements spécifiques sur les caractéristiques et le comportement des particules biologiques faisant l'objet du suivi. Les incertitudes liées au modèle de suivi des particules biologiques peuvent être bien plus importantes que celles liées au modèle hydrodynamique.
12. Aucune étude sur les dériveurs n'a été menée dans la région des îles Discovery afin d'y valider le modèle de suivi des particules passives. Toutefois, au vu des études sur les

dériveurs menées dans d'autres régions, le mouvement des dériveurs et la dispersion simulée des particules observés dans la région étudiée de Broughton devraient coïncider plus ou moins avec ceux du modèle des îles Discovery.

CONCLUSIONS ET AVIS

Le modèle hydrodynamique FVCOM et les modèles de suivi des particules conviennent pour simuler la dispersion des particules à partir de sources ponctuelles dans les régions complexes des îles Discovery et de l'archipel de Broughton, en Colombie-Britannique. Leur application peut être élargie afin d'étudier la connectivité entre deux sites d'aquaculture et des caractéristiques de l'écosystème (p. ex., estuaires des rivières, zones d'élevage de mollusques et de crustacés, ou autres paramètres locaux sensibles sur le plan environnemental). Les exemples d'applications examinés dépendaient des prévisions du devenir des particules fondées sur les données historiques. Toutefois, les modèles peuvent être utilisés pour prédire la dispersion future des particules, à condition que des prévisions existent pour tous les champs de forçage, ce qui n'est actuellement pas le cas.

En particulier, les modèles pourraient être appliqués pour simuler la dispersion probable des particules dans divers scénarios de gestion et de production. De même, il est possible d'orienter les décisions liées à l'implantation de nouvelles installations aquacoles dans les régions étudiées ou à la modification du nombre de ses installations dans une région donnée.

Les modèles peuvent simuler la dispersion des particules, y compris celles présentant des caractéristiques biologiques. Les incertitudes liées aux paramètres et aux caractéristiques biologiques nécessitent de faire preuve de prudence dans l'interprétation des résultats.

Il serait possible d'améliorer le rendement du modèle hydrodynamique FVCOM en fournissant des données de forçage atmosphérique plus précises, en utilisant des grilles de résolution plus fine et en améliorant l'état des frontières ouvertes. En ce qui a trait au rendement du modèle de suivi des particules, certains types de particules peuvent nécessiter des hypothèses de rechange quant à leur comportement aux frontières (p. ex., les littoraux) et à diverses profondeurs (p. ex., déplacement nycthéméral).

Les contraintes de mise en œuvre des modèles suggèrent qu'il faudrait mettre l'accent sur la création de résultats enregistrés qui représentent un intervalle de périodes, des conditions météorologiques représentatives et des conditions de rejet de l'eau douce. Ces résultats seraient ensuite intégrés à d'autres données géoréférencées (p. ex., trajectoires migratoires des stocks de poissons sauvages, aires marines protégées, zones d'élevage des mollusques et crustacés).

Le modèle hydrodynamique et le modèle de suivi des particules pourraient être utilisés en dehors de l'aquaculture, notamment pour modéliser les particules liées à des déversements d'agents polluants ou à la dispersion des larves. Ils peuvent également être utilisés pour étudier l'énergie marémotrice.

SOURCES DE RENSEIGNEMENTS

Le présent avis scientifique résulte de la réunion qui s'est tenue du 20 au 22 janvier 2014, sur le thème « Évaluation de la capacité du modèle hydrodynamique et du modèle de suivi des particules à éclairer les décisions concernant la sélection des sites et la gestion des installations de pisciculture marine en Colombie-Britannique ». Toute autre publication découlant de cette réunion sera publiée, lorsqu'elle sera disponible, sur le calendrier des avis scientifiques de Pêches et Océans Canada.

Foreman, M.G.G., Czajko, P., Stucchi, D.J., and Guo, M. 2009. A finite volume model simulation for the Broughton Archipelago, Canada (consulté le 1er juin 2017). Ocean Model. 30:29-47.

Foreman, M.G.G., Stucchi, D.J., Garver, K.A., Tuele, D., Isaac, J., Grime, T., and Guo, M. 2012. A circulation model for the Discovery Islands, British Columbia (consulté le 1er juin 2017). Atmos. Ocean. 50:301-316.

Hayco. 2010. *Wind observations in Douglas Channel, Squally Channel and Caamaño Sound.* Technical Data Report for the Enbridge Northern Gateway Project, Vancouver.

Salama, N.K.G., and Rabe, B. 2013. Developing models for investigating the environmental transmission of disease-agents with open-cage salmon aquaculture (consulté le 1er juin 2017). Aquacult. Environ. Interact. 4:91-115.

CE RAPPORT EST DISPONIBLE AUPRÈS DU :

Centre des avis scientifiques (CAS)
Région du Pacifique
Pêches et Océans Canada
3190, chemin Hammond Bay
Nanaimo (Colombie-Britannique) V9T 6N7

Téléphone : 250-756-7208
Courriel : csap@dfo-mpo.gc.ca
Adresse Internet : www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/

ISSN 1919-5087
© Sa Majesté la Reine du chef du Canada, 2018

La présente publication doit être citée comme suit :

MPO. 2018. Évaluation des capacités du modèle hydrodynamique et du modèle de suivi de particules afin d'éclairer les décisions sur le choix des sites et la gestion des installations de pisciculture marine en Colombie-Britannique. Secr. can. de consult. sci. du MPO, Avis sci. 2018/023.

Also available in English:

DFO. 2018. Assessment of the ability of hydrodynamic and particle tracking models to inform decisions on siting and management of marine finfish aquaculture facilities in British Columbia. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Sci. Advis. Rep. 2018/023.